持续性注意低频波动的机制与干预*

王一峰 唐雨竹 肖坤辰 荆秀娟

(四川师范大学脑与心理科学研究院 成都 610000)

摘要：持续性注意是个体在一段时间内将注意保持在某个客体或活动上的能力，是顺利完成日常活动和工作学习的关键。然而，随着时间的推移，注意水平会不断波动，对正在进行的活动产生负面影响。持续性注意的正常发展，及其在神经、精神类疾病患者中的异常波动发生在多个亚慢波频率。现有研究把持续性注意的波动简化为有限认知资源的权衡和分配，难以涵盖其多种认知成分、多个波动频率的复杂特征。本研究旨在探究持续性注意低频波动的认知神经机制，包括：（1）探究持续性注意核心认知成分波动的脑时空特征，建构持续性注意的认知成分波动假说；（2）通过亚慢波经颅电刺激，从频率（时间）和靶点（空间）两方面探索基于持续性注意成分低频波动特征的干预机制，并验证提出的持续性注意的认知成分波动假说；（3）考察持续性注意和注意网络之间的交互作用，探索持续性注意的成分波动假说的外延。本研究有助于深化对持续性注意认知结构和神经波动时空特征的理解，并为持续性注意波动的精准干预提供重要参考。

关键词：持续性注意，脑时空特征，低频脑活动，亚慢波经颅电刺激，注意网络

分类号：B842

1 引言

持续性注意(sustained attention)是个体长时间将注意保持在特定刺激或任务上，以完成目标导向行为的能力(Qiao et al., 2022)。持续性注意过程中需要将注意集中在正从事的任务上，同时抵抗环境中的干扰；这至少需要三种认知功能共同工作：监测和评价正在进行的认知过程、激活与任务相关的过程、抑制与任务无关的过程(Clayton et al., 2015)。从这个意义上讲，持续性注意是一种包含多种成分的复杂注意功能。

然而，持续性注意会随时间的流逝不断波动。已有研究发现，持续性注意会在相对集中的“专注状态”和相对分心的“非专注状态”之间动态波动(Esterman et al., 2013)。在生活中，即使是短暂的注意波动也可能产生广泛的负面影响，比如学习成绩下降、工作失误，甚至造成安全隐患。在心理学实验中，注意波动不仅会影响抑制控制、知觉检测等多种认知过程，也会影响实验操作的稳定性，是心理学研究中可重复性危机的可能原因之一(Draheim et al., 2019)。一系列基于渐变式连续操作任务(gradual-onset continuous performance task, gradCPT)的研究表明，持续性注意中主要存在警觉下降和注意波动两种不同时间尺度的过程(Esterman & Rothlein, 2019)。而持续性注意的发展及其在多动症、孤独症等患者中的异常波动发生在多个亚慢波频率(Adamo et al., 2014)。除了警觉成分，持续性注意还包含抑制控制、心智游移等不同成分。在真实场景中，持续性注意还参与到各种各样的认知任务中，其波动呈现出复杂而独特的时间尺度特征。因此，解释持续性注意波动的机制、避免波动带来的负面影响，有必要关注不同认知和神经活动的低频波动特征。

持续性注意的研究已经形成了多种理论。其中，有三类理论对持续性注意水平随任务时间延长而波动这一现象做出了解释。资源消耗理论(resource-depletion /overload theory)认为，持续性注意的下降是由于随着时间的延长，个体信息处理资源逐渐消耗(Warm et al., 1996)。负荷不足理论(mindlessness /underload theory)则认为，任务的简单枯燥会造成注意脱离当前任务，从而导致持续性注意表现变差(Robertson et al., 1997)。资源控制理论(resource-control theory)结合了前两种理论，强调了执行控制的关键作用。执行控制的失败会导致分配给任务的认知资源不足或者认知资源转移到外部干扰物，从而影响持续性注意任务的表现(Cunningham et al., 2012)。以上三种理论均把持续性注意的缓慢波动简化为有限资源权衡和分配的过程，而其他成分在注意波动的过程中可能是被动的、不变的。然而，这些

* 本文系国家自然科学基金面上项目“持续性注意波动的认知神经机制”（项目编号：32471101）的研究成果之一；
通讯作者：王一峰，Email：wyf@sicnu.edu.cn；荆秀娟，Email：jxjsicnu@163.com。

理论无法解释在不同的认知任务中，持续性注意的总体波动特征会因其各成分的权重不同而有所差异的现象。因此，阐明持续性注意中的不同认知成分的波动特征以及它们与其他认知功能的交互作用机制对理解持续性注意的波动随情境的变化至关重要。

我们前期对注意网络和低频脑活动进行了大量研究。开发的稳态组块范式不仅实现了对单一认知任务的连续稳定操纵，还有效分离了不同注意成分及其相互作用(Wang et al., 2015; Wang et al., 2016)，为探究不同认知任务场景下的持续性注意波动、解码持续性注意的成分提供了合适的工具。亚慢波脑活动与持续性注意波动的频率相吻合(Esterman & Rothlein, 2019; Qiao et al., 2022)，根据亚慢波段行为-生理-神经信号波动的相似性(Palva & Palva, 2012)，我们认为相同时间尺度上脑活动的效率与认知操作的效率相耦合可能是持续性注意波动的原因及底层机制。根据认知的频谱指纹假说(Siegel et al., 2012)，每种认知功能有其对应的神经回路，而每条神经回路有其最优工作频率，因而每种认知功能表现出独特的宏观波动特征(Keitel & Gross, 2016)。据此，我们提出“持续性注意中的不同认知成分主导不同波动特征”的观点。

本研究旨在理解持续性注意低频波动的认知神经机制，结合持续性注意研究的新范式与多模态数据，揭示持续性注意核心认知成分的低频波动特征；并采用亚慢波无创脑刺激为“不同认知成分有不同的波动特征”提供因果证据，优化持续性注意波动的干预方案；最后，根据持续性注意参与到其他认知任务中的实际情况，探讨其与其他注意功能的交互作用，阐明不同认知任务对持续性注意低频波动的影响，增进研究的生态效度与应用价值。

2 文献综述

2.1 持续性注意波动的理论解释

持续性注意水平随时间而下降和波动是持续性注意的重要特征。对此，主要有三类代表性的理论解释。资源消耗理论认为，持续性注意水平下降是维持特定任务所需的认知资源枯竭的表现(Parasuraman & Mouloua, 1987)。个体完成任务时需要认知资源的参与，当恢复的速度跟不上消耗的速度时，认知资源就会耗尽，导致注意水平下降，任务表现变差(Warm et al., 2008)。然而，资源消耗理论无法解释资源消耗更少的简单任务比复杂任务的持续性注意水平下降更大这一现象。对此，负荷不足理论则强调任务的单调重复会导致个体的注意偏离任务，在完成任务时心智游移，从而导致注意水平下降(Smallwood, 2010)。两者从不同角度指出任务本身的复杂性影响个体投入到当前任务上的认知资源，但都没有有效分离个体所拥有的认知资源和投入到任务中的资源。资源控制理论进一步考虑了资源分配的灵活性，将持续性注意水平的变化解释为资源分配的结果，认为最关键的是执行控制的作用。注意资源总量是固定的，不会随着时间改变。心智游移反应的是个体的一种默认状态，会消耗原本用于当前任务的注意资源(Smallwood, 2013)。个体对任务目标的执行控制会随着时间的延长而减弱，导致认知资源在任务上的分配减少，人们会以一种自动化的方式处理任务，大脑会将任务释放的资源重新分配到任务无关的默认状态的加工上，即产生更多心智游移(Thomson et al., 2015)。考虑到注意集中和心智游移之间的相互作用，资源控制理论认为，与执行注意网络相关的区域和默认网络区域会随着持续性注意水平的波动而波动(Fortenbaugh et al., 2017)。这一理论得到脑激活结果的支持：持续性注意波动与前扣带回(anterior cingulate cortex, ACC)为核心的额顶网络激活有关，ACC 信号表现出先增强后缓慢下降达到基线的趋势。这既符合资源控制理论中“当持续性注意随着时间推移而所需资源减少时，资源分配将有利于非任务的默认状态”的观点，也间接显示出持续性注意过程中的资源消耗存在波动。

上述理论在解释持续性注意的波动这一现象时，均将其简化为由于资源有限而不得不作出一些权衡和分配的过程，而没有讨论持续性注意不同成分在其中的作用。除了注意水平的整体变化，有研究者通过反应时变异性以及信号检测论的漏报、虚报等指标测量了注意波动、注意

缺失、抑制控制等成分，但目前尚无研究揭示这些成分的低频波动特征(Jayakumar et al., 2023; Kucyi et al., 2017)。有研究者提出了持续性注意的模型，但该模型仅仅区分了警觉下降和注意波动这两类变化，并未将它们与上述认知成分联系起来(Esterman & Rothlein, 2019)。由此可见，研究者在理论和实证研究中均已关注到持续性注意存在多种波动特征、包含多种认知成分，但两部分研究彼此相对割裂，因此有必要将两部分研究整合起来，考察持续性注意过程中不同认知成分的低频波动特征，有望系统阐明持续性注意低频波动的认知神经机制。

2.2 持续性注意波动的时间尺度

节律性是神经活动的基本特征之一。不同脑区之间主要通过节律性神经活动来进行信息交流以实现认知功能(Rosso et al., 2023)。认知神经科学的研究发现，不同时间尺度下的神经振荡与不同的注意功能相联系。比如，α 波与警觉状态、抑制控制等成分相关，而 β 波则与注意集中相关(Clayton et al., 2015)。然而，神经振荡理论认为，高频振荡通常局限于较小的神经元群体，而低频振荡则涉及更大的脑网络规模(Buzsáki & Draguhn, 2004)。因此，传统的脑电节律虽然可以描述单一试次中的注意状态，但无法刻画注意状态在试次间随时间发生的变化。从试次间的波动看，持续性注意波动在小学阶段的发展主要表现为亚慢波降低，这与注意的稳定性增强有关(Lewis et al., 2017)。在多动症患者的身上也发现了持续性注意在亚慢波多个频率上的异常波动(Karalunas et al., 2013)。目前已经发现，持续性注意在低频范围内存在警觉下降和注意波动两种不同时间尺度的波动，无论是持续性注意的正常发展还是其在发展障碍中的异常，其波动都发生在以 0.01-0.5 Hz 的亚慢波为主的多个频段(Esterman & Rothlein, 2019)。根据脑功能的时空结构理论，不同频率之间的相互耦合，会在大脑的内在活动中产生一个复杂的时间结构，并与空间结构和大脑的各种神经网络有关(Northoff, 2024)。已有研究也发现，亚慢波能够通过跨频率耦合(cross-frequency coupling, CFC)机制调节传统脑电节律(Monto et al., 2008; Thompson et al., 2014)。但由于目前 CFC 的研究主要集中在传统脑电节律之间(Yakubov et al., 2022)，亚慢波与高频振荡耦合的研究寥寥无几，这种耦合跟认知功能的关联还未得到有效揭示。因此，目前仍不清楚持续性注意在长时间尺度上缓慢波动的神经机制，以及这些波动如何调节每个试次的注意状态。

2.3 持续性注意波动的干预

持续性注意在不同时间尺度的波动往往会对人们的日常生活及工作、学习产生负面影响，这种现象出现在许多常见的神经、精神类疾病中，如多动症、孤独症以及情感障碍等(Hegerl & Hensch, 2014)。如何通过外部干预增强注意力是心理康复、认知与脑调控等领域面临的重要问题之一。

通过无创的经颅刺激干预脑功能网络是解决该问题的重要研究方向。目前针对持续性注意的经颅刺激主要有两种类型。第一类干预方式强调空间靶点的重要性，但收效一般。例如：额叶经颅直流电刺激(transcranial direct current stimulation, tDCS)能够增加心智游移，但不会改善持续性注意的稳定性(Axelrod et al., 2015)；右侧背外侧前额叶(dorsolateral prefrontal cortex, DLPFC)和后顶叶的高精度 tDCS 可以调节抑制控制功能，但没有减弱警觉水平的降低(Luna et al., 2020)。第二类则是通过夹带神经振荡来干预认知功能。研究者通常采用 θ、α 或 γ 波的经颅交流电刺激(transcranial alternating current stimulation, tACS)干预持续性注意的波动，但未得到一致的结果。Clayton 等人发现，与伪刺激和 γ 刺激相比，顶枕区的 α-tACS 促进了自上而下的控制，减弱了警觉随时间降低的趋势(Clayton et al., 2019)。其他研究者则发现，α 和 θ 频段的 tACS 均能提高唤醒水平，但只有 α 刺激提高了抑制控制水平(Martínez-Pérez et al., 2022)。Wei 等人发现，通过 tACS 调节内侧和外侧 PFC 之间的 θ 同步可以因果性地降低警觉下降的幅度(Wei et al., 2021)。相反，另一项研究在内侧 PFC 分别施加 α 和 θ 刺激，发现 α 刺激减少了警觉下降，但 θ 刺激加剧了警觉

下降(van Schouwenburg et al., 2021)。虽然大部分研究认为 α-tACS 能有效调节持续性注意，但其效应是阻止警觉下降还是增强抑制控制尚无定论。总体而言，这些结果暗示持续性注意包含多种成分，每种成分的神经回路、优势频段、脑区可能并不相同。因此，阐明不同成分的时（频率）、空（脑区和神经回路）特征，对于持续性注意的精准干预至关重要。

2.4 持续性注意和其他注意功能的交互作用

持续性注意的波动受到兴趣、情绪状态、唤醒等各种因素的影响(Jayakumar et al., 2023)，也在不同认知任务之间存在差异(Terashima et al., 2021)，说明持续性注意与各种认知任务存在着不同程度的交互作用。作为一种复杂注意功能，持续性注意需要通过基本注意功能的协作来实现，并与其他认知功能产生相互作用。目前，对基本注意功能的主流分类的方式是将其分为警觉、定向和执行控制三个注意网络(Posner & Petersen, 1990)，它们在多数认知任务中协同发挥作用。在持续性注意过程中，个体需要长时间保持警觉，同时也需要执行控制来抑制分心，从而把注意长稳定地定向到当前任务(Esterman & Rothlein, 2019)。为了更好地研究不同成分之间的相互作用，警觉可以分为唤醒成分和执行成分，执行成分的降低受到任务期间执行控制的调节(Luna et al., 2022)。然而，过往研究并没有深入探讨持续性注意各成分与不同注意网络的相互作用及其波动特征。因此，探究持续性注意与注意网络的交互作用，考察持续性注意的波动是否因认知任务而异是解决持续性注意的独立性和生态效度必须解答的问题。

2.5 简要述评

综上所述，现有关于持续性注意波动的研究为本研究的顺利开展奠定了一定的基础，已初步揭示了持续性注意的持续时间与影响因素等，但较少对其多成分、多频率的波动特征进行探究。

首先，持续性注意核心成分的波动特征及神经机制尚不明确。持续性注意是一种包含了警觉、抑制控制等多种成分的复合注意功能。然而，现有研究选择性地研究持续性注意的部分成分，甚至只研究总体表现，缺乏对其内部结构的系统研究；不同的研究在任务难度、反应概率、反应方式等方面的要求不同，造成了不同认知成分的权重在任务间的差异，导致不同研究的结果难以比较、实验结果难以重复。此外，注意的节律理论认为，低频振荡会将神经活动组织成交替的注意状态(Fiebelkorn & Kastner, 2019)。以往研究也发现持续性注意波动的发展及其在多动症中的异常波动多发生在亚慢波频段，但这些研究未对持续性注意中各核心认知成分的波动特征进行区分，只考虑了其整体的波动情况。因此，对持续性注意核心认知成分低频波动特征的解码是阐明其内部结构的必由之路。

其次，对于如何减少持续性注意波动对认知任务的影响，暂无精准有效的方法。由于持续性注意的异常波动与各种神经、精神类疾病相关，即使其正常波动也会影响工作效率，甚至造成重大灾难，故而有必要探寻调节持续性注意波动的有效方法。现有基于传统脑电节律的干预，虽然能够有效地调节长时间的警觉下降，但没有探讨对持续性注意缓慢波动的影响。无论是强调准确空间靶点的 tDCS 干预，还是强调特异性神经节律的 tACS 干预，对持续性注意波动的干预均没有达到很好的效果。由于持续性注意波动的发展及其在多动症中的异常波多发生在 0.05 Hz 附近，所以有理由推断持续性注意核心成分的低频波动可能围绕在 0.05 Hz 附近。据此，已有研究在 0.05 Hz 施加振荡式 tDCS (Oscillatory-tDCS, O-tDCS)，实现了对抑制控制和心智游移等成分波动的有效调节，其效应量远高于传统 tDCS(Qiao et al., 2022)。因此，根据脑功能活动的时空特征，在亚慢波段施加刺激进行精准干预或许能够有效提升干预效果。

最后，持续性注意与其他认知功能的交互作用对其波动性的影响尚不明确。持续性注意的研究通常采用连续操作范式，但日常生活中持续性注意的波动体现在执行各种认知任务的过程中， 因此，要探究持续性注意的波动是否受到任务类型的影响，需使用稳态组块设计将这两种任务结合起来。(Wang et al., 2016; Zhang et al., 2023)。由于不同认知任务涉及的神

经回路不同，阐明持续性注意与其他认知功能的互动关系，将为理解不同脑网络之间的相互作用及其动态变化提供新启示。考虑到认知功能的种类繁杂多样，考察持续性注意与基本注意功能的交互作用可能是解决这一问题的良好起点。

3 研究构想

本研究针对持续性注意低频波动的认知神经机制这一核心问题，结合行为、脑电、功能磁共振(functional magnetic resonance imaging, fMRI)等多模态技术和无创脑刺激方法，采用三个具体研究系统探索持续性注意核心认知成分的低频波动特征、干预机制以及与基本注意功能的交互作用。

研究 1 依据认知的频谱指纹假说、注意的节律理论、神经振荡理论、脑功能的时空结构理论等认知神经科学理论，采用经典的 gradCPT 范式，结合行为-生理-神经波动特征，解码持续性注意的核心认知成分的波动特征。研究 1 旨在分离持续性注意中的不同认知成分，并根据不同认知成分的低频波动特征来阐明其认知神经机制，建构持续性注意的成分波动理论。研究 2 则基于研究 1 的结论，在持续性注意核心认知成分的优势频率、神经回路的关键靶点上施加亚慢波经颅电刺激(transcranial electric stimulation, TES)，从频率（时间）和靶点（空间）两方面探索基于持续性注意成分波动特征的干预机制、开发持续性注意的精准干预方案，并验证研究 1 的持续性注意成分波动理论。研究 1 与研究 2 相结合，为“不同认知成分有不同的波动特征”提供因果证据，完善持续性注意的成分波动理论。研究 3 通过自主开发的高信度复合注意测验，考察持续性注意的波动在警觉、定向、执行控制和基线条件下的差异，探究持续性注意与注意网络之间的交互作用，探索持续性注意的成分波动理论的外延，提升研究的生态效度和实用价值。本研究的框架如图 1 所示。

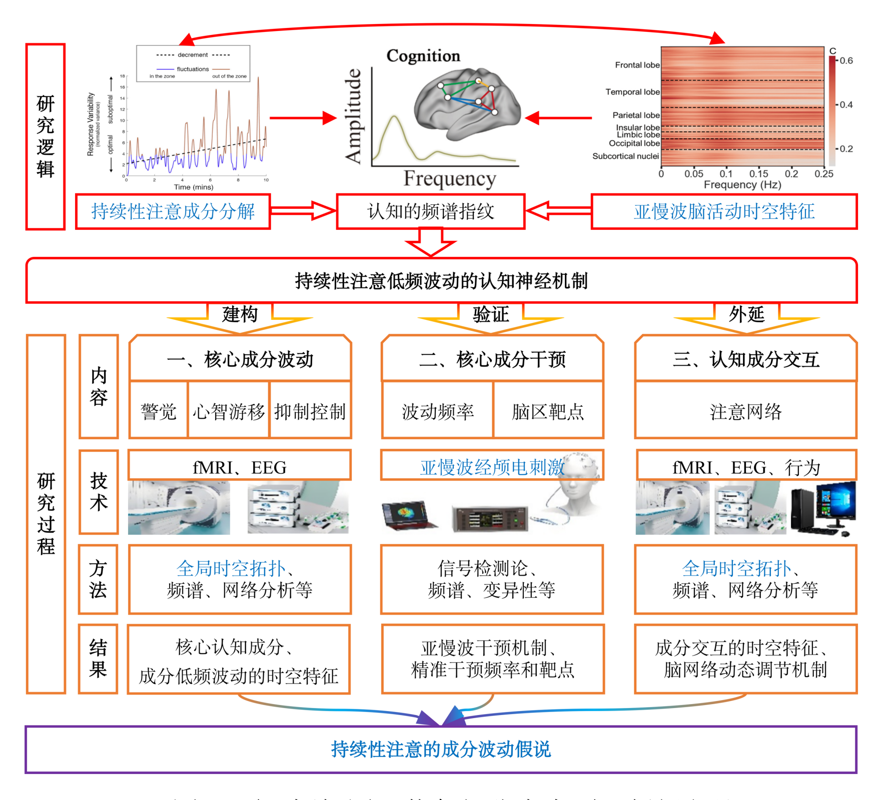


图 1 项目框架图（蓝色部分为本项目创新之处）

3.1 研究一：持续性注意核心认知成分的波动特征研究

以往研究发现持续性注意包含多个认知成分，但并未将这些成分有效分离并揭示其波动的认知神经机制。本研究依据认知的频谱指纹假说、注意的节律理论、神经振荡理论、脑功能的

时空结构等理论操纵 gradCPT 的探针（不需反应的刺激），根据不同的行为-生理-神经波动特征，解码持续性注意的核心认知成分。

实验 1 旨在探究警觉和心智游移波动的神经生理特征。本研究通过两个单因素被试内子实验建立警觉和心智游移低频波动的检测指标，同时揭示其波动特征。目前已知脑电的 θ 和 α 节律等指标与试次内的警觉水平直接关联，功能磁共振的全局信号(global signal, GS)与警觉波动相关，但没有公认的警觉低频波动的行为指标。本实验通过融合行为测量和神经生理指标随时间变化的低频波动特征，建立一个综合、可靠的警觉低频波动的测量体系，刻画其在行为-生理-神经层面的时空波动特征。其中，实验 1a 采用无探针的 gradCPT，融合同步记录的行为和脑电数据，以行为反应时、漏报率、虚报率、θ 功率等的低频功率谱为因变量，刻画警觉水平的低频波动特征。实验 1b 同样采用无探针的 gradCPT，融合行为和 fMRI 数据，以行为反应时、漏报率、虚报率等的低频功率谱、GS、全局时空拓扑等为因变量，建立反应时和全局时空拓扑的关联，进一步揭示警觉低频波动的时空特征。

在 gradCPT 中，通常认为行为反应的异常或缺失与心智游移有关。心智游移与默认网络和额顶网络有关，也跟脑电 α 节律有关，因此实验 1a 可通过行为与脑电数据融合，以 α 节律的低频功率谱为因变量，来考察心智游移波动的频率特征。实验 1b 进一步以实验 1a 建立的行为效标与 fMRI 指标的耦合来考察心智游移波动的空间特征。两个实验共同揭示心智游移波动的时空特征。

根据此前持续性注意发展和干预的相关研究结果，实验 1 预期会在 0.05 Hz 和 0.1 Hz 附近发现与警觉和心智游移相关的峰值频率。由于警觉和心智游移的神经生理效标不同，预期二者具有可分离的低频波动频率特征。

实验 2 旨在探究抑制控制波动的神经生理特征。本研究通过两个子实验（单因素被试内设计）控制有无探针（2a）和探针出现的概率（2b），以调节对抑制控制的需求，通过行为和脑电技术检测抑制控制低频波动的特征。在 gradCPT 中，探针出现时需要抑制行为反应，因而通过操纵探针可以改变任务对抑制控制的需求，从而结合行为和脑电优势频率的变化考察其波动特征。

实验 2a 中，自变量为有无探针，有探针条件为：探针出现概率为 20 %，融合同步记录的行为和脑电数据，以行为反应时、虚报率、漏报率、脑电的 P3 成分等的低频功率谱为因变量，通过行为与脑电指标的耦合考察抑制控制低频波动的频率特征。实验 2b 则通过探针概率的比较考察对抑制控制低频波动特征的影响。由于探针概率不仅体现了对抑制控制的需求，还会影响任务难度、警觉准备、心智游移等过程，通过对探针概率的操作可进一步反映持续性注意主要成分之间的相互作用及其对持续性注意波动特征的影响。具体来说，实验 2b 中，自变量为探针的概率(10 %、20 %、30 %)，以行为反应时、虚报率、漏报率、脑电的 P3 成分等的低频功率谱为因变量，考察不同抑制控制需求对低频波动的影响。

根据此前关于抑制控制低频波动的相关研究结果，实验 2 预期在有无探针的实验条件下，抑制控制波动的峰值出现在 0.01 Hz 以下；在操纵探针概率的实验条件下，由于在探针概率越高被试需要做出更多的抑制反应，因此探针概率高的情况下虚报率可能更高，探针概率低的情况下漏报率可能更高，这会导致相关成分的低频波动特征发生变化。同时，与抑制控制、注意集中等成分相关的脑电波动特征也可能发生同步变化。如果“不同认知成分有不同的波动特征”这一假设成立，则抑制控制和其他成分的波动特征应该是可分离的。

3.2 研究二：基于波动特征的持续性注意干预机制研究

我们前期采用 0.05 Hz 的 O-tDCS 成功干预了持续性注意的抑制控制、心智游移、注意集中性和稳定性等成分，其效应远远超过传统 tDCS，表明亚慢波 TES 能更有效地提升持续性注意水平，也为基于波动特征的干预指明了方向(Qiao et al., 2022)。本研究将在研究一的基础上继续探索 O-tDCS 干预持续性注意波动的机制，揭示成分特异性的频率和靶点。

实验 3 旨在研究干预持续性注意低频波动的刺激频率效应。本实验为二因素混合设计，刺激频率（警觉峰值频率、抑制控制峰值频率、心智游移峰值频率等)为被试间变量，测试时间（刺激前、刺激中、刺激后）为被试内变量，因变量为行为反应时、虚报率、漏报率、EEG 信号等指标的低频功率谱。具体来说，本实验采用不同成分在研究一中确定的 3-4 个优势频率，以经典的左侧背外侧前额叶为靶点实施 O-tDCS，考察不同频率的刺激是否能特异性增强不同成分，结合行为和脑电技术探索基于认知成分低频波动特征的精准干预机制。

实验 3 预期在相应成分的优势频率上施加刺激可以更显著地调节该成分。

实验 4 旨在研究干预持续性注意低频波动的刺激靶点效应。本实验为二因素混合设计，干预靶点（警觉靶点、抑制控制靶点、心智游移靶点等）为被试间变量，测试时间为被试内变量，因变量为行为反应时、虚报率、漏报率等及其低频功率谱。具体来说，本实验以研究一确定的 3-4 个不同成分的核心皮层区域为刺激靶点实施 O-tDCS，刺激频率为 0.05 Hz。该频率已被证明能同时增强持续性注意的多个子成分。同时，结合行为和脑电技术考察基于认知成分的特异性神经回路增强对应认知成分的精准干预机制。

实验 4 预期在相应成分的特异性靶点上施加刺激可以更显著地调节该成分。

研究二从频率（时间）和靶点（空间）两方面探索基于持续性注意成分波动特征的精准干预机制，一方面验证持续性注意的成分波动假设，另一方面基于新的成分波动理论开发持续性注意的精准干预方案。

3.3 研究三：认知成分交互作用的低频波动机制研究

本研究采用自主开发的高信度复合注意测验(High Reliability-Composite Attention Test, HR-CAT)，考察持续性注意的波动在警觉、定向、执行控制和基线条件下的差异。通过两个子实验，分别考察注意网络的行为和脑电信号低频波动特征以及 fMRI 信号低频波动特征，共同探索在基线水平上增加不同注意网络成分时，持续性注意的行为-电生理-神经血氧信号波动的时空特征。

实验 5 为被试内设计，每名被试完成 HR-CAT 中的警觉、定向、执行控制和基线四个任务。本实验采用稳态组块设计，基于行为、脑电和功能磁共振技术探索持续性注意与注意网络交互的波动特征。实验 5a 以各个注意功能的反应时、正确率以及脑电成分的低频功率谱为因变量，考察注意网络的行为和脑电信号低频波动特征。实验 5b 以各个注意功能的反应时、正确率的功率谱以及 fMRI 信号的亚慢波时空拓扑结构为因变量，考察注意网络的行为和 fMRI 信号低频波动特征。两个实验共同探索在基线水平上增加不同注意网络成分时，持续性注意的行为-生理-神经波动的时空特征。

实验 5 预期不同的注意网络有不同的低频波动特征，其中警觉网络可能跟持续性注意的警觉波动重叠，执行控制网络可能跟持续性注意的抑制控制波动重叠。

4 理论建构与研究创新

注意是心理活动的门户和核心成分，影响着生活的方方面面。随时间流逝而不断波动是注意的一种重要特征。因为注意波动在生活中具有广泛的负面影响，如何揭示和利用持续性注意的波动规律已经成为教育、心理治疗、人因工程等多个领域共同关注的前沿问题。传统理论已在实验研究基础上初步识别了包括其持续时间、影响因素在内的基本属性，但目前的理论框架难以涵盖其多成分、多频率的波动特性。本研究以认知的频谱指纹假说、注意的节律理论、神经振荡理论、脑功能的时空结构等理论为基础，针对“持续性注意低频波动的认知神经机制”这一核心问题，围绕“解码持续性注意的内部成分，阐明各成分波动的脑机制”这一核心内容，阐述“持续性注意中的不同认知成分主导了不同波动特征”的观点，从而建构和验证“持续性注意的成分波动理论”。

首先，本研究拓展了注意理论，填补了当前理论未澄清持续性注意的不同成分如何参与其缓慢波动过程的空白。早期研究者大多将持续性注意等同于警觉(Mackworth, 1948)。近年来，研究者们认为与选择性注意、自上而下注意等注意类型不同，持续性注意是一种复杂的认知功能，不能简单等同于警觉，而是包含了抑制控制、心智游移等不同的成分(Sarter et al., 2001; Thomson et al., 2015)。然而，现有大部分研究依然会选择持续性注意的部分成分代表其整体，甚至只研究持续性注意的总体表现，缺乏对其各核心认知成分的系统研究。本研究从持续性注意的核心成分入手，探索不同认知成分所主导的波动特征，建构了持续性注意波动的理论，并且根据持续性注意参与到其他认知任务中的实际情况，考察了持续性注意与基本注意网络之间的交互作用，阐明不同认知任务对持续性注意波动性的影响，从而厘清理论外延。

其次，本研究完善了脑功能理论，把特定的认知成分与脑功能的时空结构联系起来，形成从神经振荡到认知成分波动到持续性注意整体波动的逻辑链条，揭示持续性注意波动的认知神经机制。认知功能是由特定的神经回路实现的。在神经回路中，通过多层级的节律性神经活动交流信息是进化形成的一种主要的脑内信息传递模式(Buzsáki, 2009)。由于路径长度、传输速度等因素的影响，每个脑区和回路都有其特定的频谱特征，而协调更大范围的神经活动需要更低频的节律调节，这使得每种认知功能在宏观上表现出缓慢波动的频谱特征(Keitel & Gross, 2016)。认知的频谱指纹把每种认知功能与特定的脑活动时空特征相联系，是一种新颖且有效的定义认知功能的方法(Siegel et al., 2012)。我们前期使用静息态和稳态组块设计的连续操作任务揭示了亚慢波脑活动的多频率波动特征(Ao et al., 2023; Wang et al., 2018; Wang et al., 2020)，而持续性注意的波动刚好落在亚慢波的频段范围内(Esterman & Rothlein, 2019)，我们据此推断不同频率的波动可能与持续性注意的不同认知成分有关。由于行为、电生理、血氧信号在亚慢波段表现出相似的振荡特征，通过亚慢波脑活动的时空结构解码持续性注意的波动机制既具有必然性、必要性，也具有天然优势。本研究采用行为、脑电、fMRI 等研究方法，结合自主开发的亚慢波 TES 和全局时空拓扑分析技术等，从生理-心理-神经耦合的角度探讨持续性注意波动的认知神经机制。在研究方法上，推动认知功能的脑区和脑网络研究走向时空结构研究，同时验证和完善“时空神经科学”(Northoff, 2024)、“认知的频谱指纹”(Siegel et al., 2012)等前沿理论。在研究内容上，把心理学对传统神经节律的研究扩展到亚慢波脑活动研究，促进对心理活动“宏观波动”、“慢过程”的认识(Kringelbach et al., 2015; Wilckens et al., 2018)。

最后，本研究丰富了无创脑干预领域的研究，提供了持续性注意波动的精准时空靶点。由于持续性注意的异常波动与各种神经、精神疾病有关，即使是正常波动也会对工作和学习效率造成影响，甚至可能导致重大灾难，因而有必要探寻调节持续性注意波动的有效方法。根据脑功能活动的时空特征进行精准干预能够有效改善干预效果。本研究在持续性注意的核心认知成分对应的优势频率、神经回路的关键靶点上施加亚慢波 TES，通过认知-频率-脑区特异性效应验证认知成分与波动特征的关联。一方面为持续性注意的成分波动假设提供因果证据，另一方面为持续性注意波动的干预提供精准靶点。亚慢波 TES 将促进对持续性注意波动特征的利用、避免波动的危害，助力个体提高学习、生活和工作质量，减少人为事故。

参考文献

Adamo, N., Huo, L., Adelsberg, S., Petkova, E., Castellanos, F. X., & Di Martino, A. (2014). Response time intra-subject variability: commonalities between children with autism spectrum disorders and children with ADHD. *European Child & Adolescent Psychiatry*, *23*(2), 69-79.

Ao, Y., Yang, C., Drewes, J., Jiang, M., Huang, L., Jing, X., Northoff, G., & Wang, Y. (2023). Spatiotemporal dedifferentiation of the global brain signal topography along the adult lifespan. *Human Brain Mapping*, *44*(17), 5906-5918.

Axelrod, V., Rees, G., Lavidor, M., & Bar, M. (2015). Increasing propensity to mind-wander with transcranial direct current stimulation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *112*(11), 3314-3319.

Buzsáki, G. (2009). *Rhythms of the Brain*. Oxford University Press.

Buzsáki, G., & Draguhn, A. (2004). Neuronal oscillations in cortical networks. *Science*, *304*(5679), 1926-1929.

Clayton, M. S., Yeung, N., & Cohen Kadosh, R. (2015). The roles of cortical oscillations in sustained attention. *Trends in Cognitive Sciences*, *19*(4), 188-195.

Clayton, M. S., Yeung, N., & Cohen Kadosh, R. (2019). Electrical stimulation of alpha oscillations stabilizes performance on visual attention tasks. *Journal of Experimental Psychology: General*, *148*(2), 203-220.

Cunningham, S., Scerbo, M., & Freeman, F. (2012). The electrocortical correlates of daydreaming during vigilance tasks. *Journal of Mental Imagery*, *24*, 61-72.

Draheim, C., Mashburn, C. A., Martin, J. D., & Engle, R. W. (2019). Reaction time in differential and developmental research: A review and commentary on the problems and alternatives. *Psychological Bulletin*, *145*(5), 508-535.

Esterman, M., Noonan, S. K., Rosenberg, M., & DeGutis, J. (2013). In the Zone or Zoning Out? Tracking Behavioral and Neural Fluctuations During Sustained Attention. *Cerebral Cortex*, *23*(11), 2712-2723.

Esterman, M., & Rothlein, D. (2019). Models of sustained attention. *Current Opinion in Psychology*, *29*, 174-180.

Fiebelkorn, I. C., & Kastner, S. (2019). A Rhythmic Theory of Attention. *Trends in Cognitive Sciences*, *23*(2), 87-101.

Fortenbaugh, F. C., DeGutis, J., & Esterman, M. (2017). Recent theoretical, neural, and clinical advances in sustained attention research. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1396*(1), 70-91.

Hegerl, U., & Hensch, T. (2014). The vigilance regulation model of affective disorders and ADHD. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *44*, 45-57.

Jayakumar, M., Balusu, C., & Aly, M. (2023). Attentional fluctuations and the temporal organization of memory. *Cognition*, *235*, 105408.

Karalunas, S. L., Huang-Pollock, C. L., & Nigg, J. T. (2013). Is reaction time variability in ADHD mainly at low frequencies? *The Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *54*(5), 536-544.

Keitel, A., & Gross, J. (2016). Individual Human Brain Areas Can Be Identified from Their Characteristic Spectral Activation Fingerprints. *PLoS Biology*, *14*(6), e1002498.

Kringelbach, M. L., McIntosh, A. R., Ritter, P., Jirsa, V. K., & Deco, G. (2015). The Rediscovery of Slowness: Exploring the Timing of Cognition. *Trends in Cognitive Sciences*, *19*(10), 616-628.

Kucyi, A., Hove, M. J., Esterman, M., Hutchison, R. M., & Valera, E. M. (2017). Dynamic Brain Network Correlates of Spontaneous Fluctuations in Attention. *Cereb Cortex*, *27*(3), 1831-1840.

Lewis, F. C., Reeve, R. A., Kelly, S. P., & Johnson, K. A. (2017). Sustained attention to a predictable, unengaging Go/No-Go task shows ongoing development between 6 and 11 years. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *79*(6), 1726-1741.

Luna, F. G., Román-Caballero, R., Barttfeld, P., Lupiáñez, J., & Martín-Arévalo, E. (2020). A High-Definition tDCS and EEG study on attention and vigilance: Brain stimulation mitigates the executive but not the arousal vigilance decrement. *Neuropsychologia*, *142*, 107447.

Luna, F. G., Tortajada, M., Martín-Arévalo, E., Botta, F., & Lupiáñez, J. (2022). A vigilance decrement comes along with an executive control decrement: Testing the resource-control theory. *Psychonomic Bulletin & Review*, *29*(5), 1831-1843.

Mackworth, N. H. (1948). The breakdown of vigilance durning prolonged visual search. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *1*(1), 6-21.

Martínez-Pérez, V., Tortajada, M., Palmero, L. B., Campoy, G., & Fuentes, L. J. (2022). Effects of transcranial alternating current stimulation over right-DLPFC on vigilance tasks depend on the arousal level. *Scientific Reports*, *12*(1), 547.

Monto, S., Palva, S., Voipio, J., & Palva, J. M. (2008). Very slow EEG fluctuations predict the dynamics of stimulus detection and oscillation amplitudes in humans. *Journal of Neuroscience*, *28*(33), 8268-8272.

Northoff, G. (2024). *From Brain Dynamics to the Mind: Spatiotemporal Neuroscience*. Academic Press.

Palva, J. M., & Palva, S. (2012). Infra-slow fluctuations in electrophysiological recordings, blood-oxygenation-level-dependent signals, and psychophysical time series. *Neuroimage*, *62*(4), 2201-2211.

Parasuraman, R., & Mouloua, M. (1987). Interaction of signal discriminability and task type in vigilance decrement. *Perception, & Psychophysic*, *41*(1), 17-22.

Posner, M. I., & Petersen, S. E. (1990). The attention system of the human brain. *Annual Review of Neuroscience*, *13*, 25-42.

Qiao, J., Li, X., Wang, Y., Wang, Y., Li, G., Lu, P., & Wang, S. (2022). The Infraslow Frequency Oscillatory Transcranial Direct Current Stimulation Over the Left Dorsolateral Prefrontal Cortex Enhances Sustained Attention. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *14*, 879006.

Robertson, I. H., Manly, T., Andrade, J., Baddeley, B. T., & Yiend, J. (1997). 'Oops!': performance correlates of everyday attentional failures in traumatic brain injured and normal subjects. *Neuropsychologia*, *35*(6), 747-758.

Rosso, M., Moens, B., Leman, M., & Moumdjian, L. (2023). Neural entrainment underpins sensorimotor synchronization to dynamic rhythmic stimuli. *Neuroimage*, *277*, 120226.

Sarter, M., Givens, B., & Bruno, J. P. (2001). The cognitive neuroscience of sustained attention: where top-down meets bottom-up. *Brain Research Reviews*, *35*(2), 146-160.

Siegel, M., Donner, T. H., & Engel, A. K. (2012). Spectral fingerprints of large-scale neuronal interactions. *Nature Reviews Neuroscience*, *13*(2), 121-134.

Smallwood, J. (2010). Why the Global Availability of Mind Wandering Necessitates Resource Competition: Reply to McVay and Kane (2010). *Psychological Bulletin*, *136*, 202-207.

Smallwood, J. (2013). Distinguishing how from why the mind wanders: a process-occurrence framework for self-generated mental activity. *Psychological Bulletin*, *139*(3), 519-535.

Terashima, H., Kihara, K., Kawahara, J. I., & Kondo, H. M. (2021). Common principles underlie the fluctuation of auditory and visual sustained attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *74*(4), 705-715.

Thompson, G. J., Pan, W. J., Billings, J. C., Grooms, J. K., Shakil, S., Jaeger, D., & Keilholz, S. D. (2014). Phase-amplitude coupling and infraslow (<1 Hz) frequencies in the rat brain: relationship to

resting state fMRI. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, *8*, 41.
Thomson, D. R., Besner, D., & Smilek, D. (2015). A resource-control account of sustained attention: evidence from mind-wandering and vigilance paradigms. *Perspectives on Psychological Science*, *10*(1), 82-96.
van Schouwenburg, M. R., Sligte, I. G., Giffin, M. R., Günther, F., Koster, D., Spronkers, F. S., Vos, A., & Slagter, H. A. (2021). Effects of Midfrontal Brain Stimulation on Sustained Attention. *Journal of Cognitive Enhancement*, *5*(1), 62-72.
Wang, Y., Chen, W., Ye, L., Biswal, B. B., Yang, X., Zou, Q., Yang, P., Yang, Q., Wang, X., Cui, Q., Duan, X., Liao, W., & Chen, H. (2018). Multiscale energy reallocation during low-frequency steady-state brain response. *Human Brain Mapping*, *39*(5), 2121-2132.
Wang, Y., Zou, Q., Ao, Y., Liu, Y., Ouyang, Y., Wang, X., Biswal, B., Cui, Q., & Chen, H. (2020). Frequency-dependent circuits anchored in the dorsal and ventral left anterior insula. *Sci Rep*, *10*(1), 16394.
Wang, Y. F., Jing, X. J., Liu, F., Li, M. L., Long, Z. L., Yan, J. H., & Chen, H. F. (2015). Reliable Attention Network Scores and Mutually Inhibited Inter-network Relationships Revealed by Mixed Design and Non-orthogonal Method. *Scientific Reports*, *5*, 10251.
Wang, Y. F., Long, Z., Cui, Q., Liu, F., Jing, X. J., Chen, H., Guo, X. N., Yan, J. H., & Chen, H. F. (2016). Low frequency steady-state brain responses modulate large scale functional networks in a frequency-specific means. *Human Brain Mapping*, *37*(1), 381-394.
Warm, J. S., Dember, W., & Hancock, P. (1996). Vigilance and workload in automated systems. *In Automation and Human Performance: Theory and Applications*, 183-200.
Warm, J. S., Parasuraman, R., & Matthews, G. (2008). Vigilance requires hard mental work and is stressful. *Human Factors*, *50*(3), 433-441.
Wei, J., Zhang, Z., Yao, Z., Ming, D., & Zhou, P. (2021). Modulation of Sustained Attention by Theta-tACS over the Lateral and Medial Frontal Cortices. *Neural Plasticity*, *2021*, 5573471.
Wilckens, K. A., Ferrarelli, F., Walker, M. P., & Buysse, D. J. (2018). Slow-Wave Activity Enhancement to Improve Cognition. *Trends in Neurosciences*, *41*(7), 470-482.
Yakubov, B., Das, S., Zomorrodi, R., Blumberger, D. M., Enticott, P. G., Kirkovski, M., Rajji, T. K., & Desarkar, P. (2022). Cross-frequency coupling in psychiatric disorders: A systematic review. *Neuroscience and Biobehavioral*, *138*, 104690.
Zhang, C., Wang, Y., Jing, X., & Yan, J. H. (2023). Brain mechanisms of mental processing: from evoked and spontaneous brain activities to enactive brain activity. *Psychoradiology*, *3*, kkad010.

The mechanism and intervention of low-frequency fluctuations of sustained attention

Yifeng Wang, Yuzhu Tang, Kunchen Xiao, Xiujuan Jing
(Institute of Brain and Psychological Sciences, Sichuan Normal University, Chengdu, 610000)

Abstract: Sustained attention is the fundamental ability to maintain attention to particular stimuli or cognitive activities over time. However, attention levels fluctuate over time, which could impede ongoing cognitive activities. The normal development of sustained attention, as well as its abnormal fluctuations in patients with neurological and psychiatric disorders, occur across multiple infra-slow frequencies. Existing research simplifies the fluctuations in sustained attention as a trade-off and allocation of limited cognitive resources, making it difficult to analyze the complex of diverse cognitive components and characteristics of multiple frequency fluctuations for sustained attention. This study aims to elucidate the cognitive neural mechanisms underlying the low-frequency fluctuations for sustained attention, which includes: (1) investigating the brain-spatiotemporal characteristics of cognitive components' fluctuations for sustained attention and proposing hypotheses for cognitive component fluctuations; (2) exploring interventions based on low-frequency fluctuations of sustained attention components, by using infra-slow wave transcranial electrical stimulation to validate the proposed hypotheses based on frequency, timing, and brain regions ; (3) examining the interaction between sustained attention and attentional networks. This study contributes to understanding the cognitive and spatiotemporal characteristics of sustained attention and provides insights for precise interventions of sustained attention fluctuations.

Keywords: sustained attention, brain-spatiotemporal characteristics, infra-slow wave transcranial electrical stimulation, attentional network

作者贡献声明：
王一峰：提出研究思路，设计研究方案
唐雨竹：论文起草
肖坤辰：论文最终版本修订
荆秀娟：进行实验